

Commission Thématique LAMINAGE

Laminage de produits plats et de produits longs, de Léonard de Vinci à nos jours



Journée d'échanges et de réflexion

« Bilan critique de la modélisation du laminage »

Mercredi 07 Novembre 2018, 9h30 – 16h30

MINES ParisTech Sophia-Antipolis, amphithéâtre Mozart

Objectifs

La simulation numérique du laminage est une réalité depuis de nombreuses années. Il n'en reste pas moins qu'entre les temps de calcul – toujours trop longs ; les phénomènes complexes de couplage – pas toujours bien compris et implémentés ; et la difficulté d'obtenir des données thermiques, mécaniques, physiques représentatives des conditions du laminage, le praticien éprouve parfois une certaine difficulté soit à réaliser une étude numérique dans un délai correct, soit à se convaincre de la fiabilité des résultats. Les membres de la Commission Thématique Laminage se proposent donc de consacrer une journée d'étude à la réalisation d'un état des lieux, de ce que qui se fait en laboratoire à la réalité de l'utilisation en entreprise.

Programme

À partir de 09.30 Accueil

09.50 – 10.05 P. Montmimonnet (MINES ParisTech CEMEF) **Introduction**

Matinée : *exemples de succès, exemples de problèmes rencontrés, évolution des besoins*

Produits plats

10.05 – 10.25 N. Souto, E. Mathey, T.S. Cao (ArcelorMittal) **Apports et limites de la simulation du laminage des produits plats à chaud et à froid.**

10.25 – 10.45 D. Cardinaux, J. Garcia (Industeel) **Simulation numérique de défauts de planéité en extrémité de tôles fortes.**

Produits longs

10.45 – 11.05 T. Sourisseau (Ugitech) **Laminage à chaud du fil en acier inoxydable : simulation de la partie ébaucheur et de la tête de mise en spires.**

11.05 – 11.25 D. Lawrjaniec (Ascometal) **Apport de la modélisation du laminage des produits longs.**

Tubes

11.25 – 11.45 N. Marouf (Vallourec) **Perçage Mannesmann : outils expérimentaux pour la validation des modèles numériques.**

11.45 – 12.05 A. Gaillac, F. Lyonnet (Framatome) **Simulation numérique du laminage à pas de pèlerin, outil d'optimisation des gammes et outillages.**

12.05 – 13.30 **Pause repas (Buffet)**

Après-midi : *modèles avancés*

13.30 – 14.00 H. Zahrouni, N. Mathieu (Univ. Lorraine) **Défauts de planéité, de l'apparition au cours du laminage à la correction par le planage**

14.00 – 14.30 C. Hubert (Univ. Valenciennes) **Hérédité de l'endommagement dans la formation des criques de rive après cisaillage à froid**

14.30 – 15.00 U. Ripert (Transvalor) **Etat de l'art du laminage sous Forge® : version stationnaire contre version incrémentale**

15.00 – 15.20 **Pause**

15.20 – 16.30 **Table Ronde :** Introduction : P. Montmimonnet (MINES ParisTech)
Synthèse des besoins et perspectives d'évolution des modèles : modèles rapides en ligne, modèles stationnaires, évolution de microstructure et texture, endommagement, qualité des données, couplage modèle-mesure...

A – Introduction – P. Montmitonnet, MINES ParisTech – CEMEF.

La journée a donc été centrée sur 9 exposés. La « commande » portant sur un bilan critique a bien été honorée, les exposés comportant comme demandé des exemples de réussites et un aperçu des limites actuelles dont ressortent systématiquement les temps CPU et la prédiction des évolutions microstructurales, ou encore le « calage » du frottement et de la loi de comportement plastique et la difficulté d'une validation poussée. La matinée a été consacrée à un état des lieux de la modélisation en R&D industrielle, 6 exposés sur le laminage des produits plats, des produits longs et des tubes. L'après-midi, deux ouvertures ont été faites par des chercheurs du monde académique sur des problématiques non abordées le matin, la planéité des tôles minces et l'effet d'hérédité cisailage / laminage à froid. Elles ont été suivies d'un exposé de Transvalor sur la simulation des laminages par des versions incrémentales ou stationnaires de Forge®. Enfin, une « table ronde » a clôturé la journée, discussion ouverte sur plusieurs thèmes dont la déformation des outillages, le dressage des barres, la modélisation des évolutions du produit, recristallisation ou endommagement, couplée ou pas au calcul de l'écoulement du métal, ou encore les perspectives d'utilisation de la Science des Données et de l'Intelligence Artificielle - concurrence ou complémentarité avec la simulation physiquement fondée ?

Pour permettre la participation la plus large possible, une connexion par Internet a été proposée. Quatre personnes dont un des orateurs en ont profité.

Le présent compte rendu est complété par les versions PDF (sans les animations) des présentations dont la diffusion a été autorisée par leurs auteurs.

B - Limits and evolution of needs in the simulation of flat product rolling – E. Mathey, N. Souto (ArcelorMittal Global R&D Maizières Process)

Le laminage à plat, du simple fait des rapports dimensionnels, conduit en éléments finis à de très gros maillages. L'exposé a illustré le besoin de deux catégories, modèles « complexes » ou « lourds » de type Eléments Finis ou autres méthodes numériques intensives, contre modèles « simplifiés » capables de tourner on-line pour gérer les automatismes ou les pré-réglages. La deuxième catégorie illustre aussi la pratique de la modélisation pour se donner compétences et outils maîtrisés capables de remplacer les « boîtes noires » des fournisseurs d'équipements. Les exemples ont été choisis au stade des cages finisseuses du train à bande à chaud :

- pour les modèles complexes, prédiction FEM du défaut de ligne de rive (de type repliement), de l'effet de la contre-flexion sur les défauts de profil et de planéité latente. Parmi les limitations, la compréhension du comportement complexe dans les intercages en tension (fluage, variation du profil d'épaisseur et de la largeur, recristallisation post-dynamique), sans compter la difficulté à maintenir un code Eléments Finis (LAM3-TEC3) en interne et le management à long terme des compétences.
- les modèles « simplifiés » peuvent être des Différences Finies pour la thermique ou des méthodes de tranches ou de bornes supérieures pour les efforts (forces et couples) et les écoulements (dimensions), ou encore un bilan d'énergies pour le refus d'engagement (« threading refusal »). La perte de précision due aux simplifications peut être compensée par un « tuning » de coefficients à l'aide de la base des données des acquisitions des capteurs pour les différents produits. De ce côté, les enjeux futurs sont de gagner en précision et en généralité en intégrant plus de physique – sans perdre l'avantage des calculs très rapides.

C - Simulation numérique de défauts de planéité en extrémité de tôles fortes – D. Cardinaux, J. Garcia (Industeel, Centre de Recherches du Creusot)

Le « ski » est un défaut de courbure d'extrémité dans un plan vertical. Celui dont il est question ici est le « ski inversé », particulièrement critique puisqu'il fait courir le risque d'un choc entre la tête d'une tôle massive et les rouleaux de la table de sortie. L'exemple porte sur une gamme comportant de nombreuses passes sur une cage réversible. Plutôt qu'un défaut de ligne de passe ou un différentiel de diamètre cylindre ou de vitesse de rotation ou encore de frottement, l'arbre des causes fait ressortir comme souvent une différence de température entre face supérieure et inférieure – le maximum étant cependant en général à cœur. Appuyée sur la littérature, la simulation par Forge® fait ressortir comme facteur associé le rapport dimensionnel Longueur de contact / Epaisseur – autre vieille

connaissance. En simulant l'ensemble d'une gamme de 14 passes, l'apparition du défaut est bien prédite à la bonne passe – ainsi que son atténuation ultérieure. La compréhension acquise ouvre la possibilité de compenser une différence de température difficilement évitable, mais mesurable, par un différentiel de vitesse d'effet opposé. Les transitoires sont cependant difficiles à gérer du fait des temps de réponse relativement longs de l'équipement.

Voilà pour la réussite. Au titre des limitations,

- les temps de calcul d'une gamme (même si ici, seule une « tranche » longitudinale a été simulée) est critique pour une entreprise qui met en œuvre de très nombreuses gammes différentes du fait d'un vaste carnet d'alliages et de formats variés à livrer.
- la difficulté à prédire la recristallisation et de coupler son effet à la loi de comportement, sachant que la microstructure qui en résulte est aussi dissymétrique, la difficulté à prendre en compte quantitativement les transformations de phases, ne serait-ce que parce que leur modélisation demande des campagnes expérimentales d'identification bien trop lourdes, vu là encore le nombre d'alliages à étudier.

D - Laminage à chaud du fil en acier inoxydable: simulation de la partie ébaucheur et de la tête de mise en spires - Th. Sourisseau (Ugitech, groupe Schmolz + Bickenbach, Centre de Recherche d'Ugine)

Cet exposé rappelle l'équilibre que la Commission souhaite donner à ses travaux entre le laminoir proprement dit et les opérations « annexes » mais si importantes (ici, la mise en spire du fil machine). Dans l'analyse du train ébaucheur, l'utilisation d'un modèle simplifié par Différences Finies (Modèle SEDEL® d'ArcelorMittal) permet une bonne approche de la thermique et, dans une moindre mesure, des forces et couples, ce qui permet la reconception de la gamme pour de nouvelles nuances. Les prédictions sont ensuite affinées par le calcul FEM Forge®: précision sur les forces et couples, calcul de l'élargissement, modélisation de l'endommagement. En vue d'un calcul précis est soulignée l'importance du travail (présent et futur) de collecte des données physiques (rhéologiques y compris l'anisotropie pour les inox biphasés, thermiques), de la prise en compte de la rigidité finie de la cage, des tensions intercages à choisir pour un calcul cage à cage typique d'un ébaucheur à plusieurs cages, des pertes de cote par usure des outils, de la recristallisation et de son impact sur la rhéologie... Dans le contexte du passage à une version stationnaire qui réduit fortement le temps de calcul, le recalage des coefficients surfaciques, coefficients de transfert thermique et de frottement, est en cours à partir de mesures de température de surface et de l'élargissement. La version stationnaire devrait permettre de traiter l'ensemble du train à fil et d'utiliser l'optimisation automatique de gamme avec comme objectif d'éviter l'endommagement (criques et lignes de laminage).

La mise en spire est faite par passage du fil dans un tube hélicoïdal en rotation rapide. Les forces d'inertie plaquent le fil contre le tube ponctuellement et en glissement à grande vitesse, le résultat : décapage des oxydes, grippages et microsoudures sur le tube et rayures sur le fil. Le calcul avec Abaqus Explicit donne accès à la trajectoire du fil, aux pressions locales de contact qui correspondent bien aux zones usées du tube de mise en spire, permettant ainsi d'initier des travaux de choix de matériaux plus résistants à l'usure et à l'adhésion – à condition de trouver le bon essai tribologique. L'analyse va être complétée par la thermique : température de contact → température de l'essai tribologique.

On voit sur ces deux exemples l'ampleur du travail d'accompagnement de la simulation numérique si l'on veut construire une modélisation prédictive et quantitative.

E - Simulation du laminage de produits longs chez Ascométal – D. Lawrjaniec (Ascometal, groupe Schmolz + Bickenbach, CREAS)

La problématique est similaire avec les aciers spéciaux en lieu et place des inox. Les besoins de recalcul des gammes viennent par exemple de l'introduction de nouvelles nuances ou d'une nouvelle géométrie de lingot, ou de l'optimisation de gammes existantes (élimination de porosité à cœur...). Le choix de l'outil numérique, modèle simplifié ou calcul FEM, diffère selon l'urgence de la demande. La réponse sur la seule température peut être relativement rapide (Différences Finies) cependant que le calcul des couples, efforts ou géométries peut maintenant se traiter en des temps raisonnables avec la version stationnaire de Forge®. Un calcul précis demande d'aller au-delà des paramètres nominaux de l'opération (exemples : levées réelles ou profil usé des cylindres, à mesurer, tensions intercages,

températures de surface pour recalage thermique). Des exemples d'application portent sur le calcul thermique sur une gamme de 31 passes sur un blooming réversible (blooming = laminage du lingot de coulée continu à la billette), avec la difficulté d'une prédiction précise de l'élargissement (voir en https://sf2m.fr/wp-content/uploads/2018/06/CR_laminage2013_11_22.pdf la complexité de ce phénomène multifactoriel) : faudra-t-il aller jusqu'au frottement anisotrope ?

La mise au point de la gamme de laminage d'un nouveau profilé est l'occasion de souligner que la simulation numérique bien utilisée peut permettre des gains considérables en temps et en essais coûteux. D'autres exemples sont montrés sur la prédiction de la fermeture des pores de coulée à partir du calcul de la triaxialité, de l'impact d'un mauvais guidage d'une barre dans le laminoir (→ vrillage), le choix d'un procédé, laminage sur cages 2 cylindres ou 3 cylindres (Kocks) ou forgeage, sur la base de la répartition du corroyage (déformation plastique à chaud).

Mais a contrario, des limitations s'illustrent par le calcul du couple lors d'un blooming 15 passes : même en prenant en compte l'incertitude des données d'entrée, la simulation ne trouve pas la passe qui expérimentalement conduit au plus fort couple de laminage. Comme le couple, multiplié par la vitesse de rotation, représente la puissance machine nécessaire, on ne peut déterminer avec certitude si une gamme donnée va « passer » ou pas sur un laminoir existant et c'est un handicap sérieux. Il reste à analyser les causes de ce demi-échec : est-ce l'absence dans le calcul du cédage des cages, d'un frottement anisotrope ou hétérogène, de la recristallisation ? Autant d'améliorations qu'il faudra apporter à terme à toutes les études.

Une des conclusions est donc que la simulation ne dispense ni de l'expertise sur le procédé et sur l'équipement disponible, ni de celle sur les matériaux.

F - Mannesman Piercing Simulation: temperature increase and other effects – N. Marouf (Vallourec, Centre de Recherches, Aulnoy-Aymeries) *(exposé non disponible)*

Lors du perçage Mannesmann (ou perçage à 2 cylindres, two-roll piercing) par lequel on peut ébaucher à chaud des tubes en acier, deux galets de forme variable, dont les axes de rotation sont décalés d'un « feed angle » par rapport à l'axe de laminage, donnent à une billette-ébauche un mouvement hélicoïdal et la poussent contre une « poire » conique à génératrice courbe. L'« effet Mannesmann » consiste en une mise en dépression hydrostatique du cœur de la billette sous l'effet de la pression des deux cylindres, phénomène caractéristique des emprises très épaisses (très faible L/h). Il s'ensuit lorsque tout va bien la formation de cavités sur l'axe, que la poire n'a plus qu'à expansive. Des rouleaux de guidage latéraux empêchent une trop forte ovalisation.

Après cette très utile introduction à ce procédé très spécial, l'exposé détaille la simulation numérique du procédé, la cinématique d'avance de l'ébauche, la température croissante de la tête au pied de l'ébauche. La température maximale est importante car elle détermine le risque de « brûlure » du métal – température critique qui dépend fortement de la nuance percée, sachant que pour que le métal soit « perçable », on est obligé de préchauffer à haute température : la marge de manœuvre est faible.

Vallourec s'est doté à Riesa, en Allemagne, d'un atelier-laboratoire de fabrication de tubes dont un perceur. La confrontation simulation – expérience est donc à l'ordre du jour, sous forme de plans d'expérience physique et numérique. Un exemple présenté est le pré-perçage, car pour certaines nuances difficiles, on usine un trou au cœur de la billette pour éviter l'effet Mannesmann quand il se révèle délicat à maîtriser. L'état actuel est que les efforts de laminage (rouleaux) et de perçage (mandrin / poire) sont surévalués, ce qui pourrait vouloir dire que la loi de comportement est mal connue à ces hautes températures, sauf que l'effort sur les disques latéraux est, lui, correct. Il faut sans doute tenir compte de l'endommagement à cœur qui est l'essence même de l'effet Mannesmann et dont la littérature montre qu'il joue sur les efforts. Les résultats soulignent aussi que c'est avant tout la vitesse d'avance de la billette qui gouverne la température maximale, alors que la torsion du tube (autre effet fréquent dans divers procédés de laminage des tubes) est régie par le réglage – ou le dérèglement - des angles de positionnement des cylindres.

Un des messages est donc que la validation des résultats numériques vaut bien un effort expérimental... et financier.

G - Simulation numérique du laminage à pas de pèlerin, outil d'optimisation des gammes et outillages – A. Gaillac, F. Lyonnet (Framatome / BU Combustible / DOC / Centre de Recherches de Cezus)

Autre procédé complexe, comme toujours avec les tubes, le laminage à pas de pèlerin (LPP) est une sorte de rouleau à pâtisserie amélioré qui permet de réduire tant l'épaisseur que le diamètre intérieur d'une ébauche tubulaire (ici forgée, usinée puis filée à chaud) autour d'un mandrin cylindro-conique. On l'utilise aussi maintenant, secondairement, pour laminier des barres pleines. L'ébauche en cours de laminage (« transition ») est avancée et tournée entre chaque aller-retour (« coup de cage ») d'une cage portant deux matrices à gorge évolutive, conjuguée au profil du mandrin : non seulement on choisit le diamètre et l'épaisseur finaux, mais encore leur évolution respective le long de la « zone de réduction ». C'est ainsi qu'on optimise la texture cristallographique finale, très importante pour l'application nucléaire. Le métal, lui, « reçoit » 50 à 100 coups de cage et se voit déformé, c'est la modélisation qui le montre, tantôt sous contrainte compressive, tantôt en tension. L'optimisation est donc de rigueur pour éviter l'endommagement que l'on peut détecter selon les alliages soit sur des précipités durs, soit dans des zones de variation brutale de texture.

Mis à part les modèles (très) simplifiés qu'il faudrait remettre à jour, ce procédé très instationnaire rend la simulation FEM « lagrangienne », incrémentale, extrêmement coûteuse. Un moyen terme a donc été développé, qui se base sur le caractère cyclique du procédé : en calculant un cycle proche de la stabilité, on peut reconstruire la trajectoire des points matériels de l'entrée à la sortie de la zone de réduction et y plaquer l'ensemble de leur histoire thermo-mécanique, ce qui permet d'aborder l'endommagement. La comparaison des efforts à des mesures sur les laminoirs permet une validation au moins partielle. Des modèles d'endommagement variés ont donc été développés et appliqués avec succès, semi-quantitativement parlant, à la conception de nouveaux outillages moins endommageants : élimination de défauts de surface internes de tubes, réduction des porosités induites au cœur de barres.

Au passage, l'ensemble de la stratégie « through process modelling » a été brièvement évoquée, depuis la chimie de l'élaboration du métal au produit fini en passant par la refusion sous vide, le forgeage, le filage et le laminage, les traitements thermiques et les contrôles.

Pour parler ambitions non encore assouvies, il reste que comme toujours avec les produits minces et qui plus est avec des zones de contact de petites dimensions, les maillages sont insuffisamment fins pour bien capturer les gradients ; que le matériau présente une anisotropie complexe, hétérogène, un endommagement initial et des gradients de microstructure qui, s'ils sont connus, sont très difficiles à prendre en compte ; que l'on néglige les déformations des matrices dont on a montré par le passé l'impact significatif sur les résultats ; les paramètres des modèles d'endommagement sont identifiés sur des essais monotones alors que le LPP impose des chargements polycycliques.

Dans ces conditions, il est difficile d'être mieux que semi-quantitatif et la question est posée : existe-t-il des modèles aussi précis mais beaucoup plus efficaces ? On pense pour le (lointain ?) futur aux techniques de réduction de modèle.

H - Défauts de planéité : de l'apparition au laminage à la correction par le planage - H. Zahrouni, S. Abdelkhalek, K. Kpogan, N. Mathieu, M. Potier-Ferry (Université de Lorraine – LEM3)

Les défauts de planéité non développables en laminage de bande (ondulations des rives, du centre, de quart de bande ou « quarterbuckles », obliques...) sont la conséquence d'un flambement élastique sous l'effet de contraintes résiduelles induites par le « différentiel d'allongement » (mesuré en $UI = 10^{-5}$ d'allongement relatif) entre particules voisines de métal lorsqu'on se déplace dans la largeur. En remontant maillon par maillon la chaîne causale, on trouve d'abord le différentiel de réduction d'épaisseur le long de la largeur, puis ce sont les déformations des cylindres que l'on met en cause : la flexion qui concerne toute la largeur (« bombé » ou « crown ») et l'aplatissement (compression d'une « fibre » radiale sous l'effet de la contrainte de laminage) qui va surtout jouer par son fort gradient près de la rive. Quant au planage qui vise à corriger ou atténuer ces défauts, il en existe de deux sortes : le planage par traction ou une très faible déformation plastique d'allongement efface les contraintes résiduelles, et le planage par rouleaux où le même effet est obtenu par une flexion alternée d'amplitude décroissante en régime élastoplastique.

En termes de modélisation, l'emprise (contact bande-cylindres) doit être modélisée en éléments finis 3D. Les zones hors emprise, susceptibles de flamber, sont mieux traitées par un modèle de coques dans lequel on introduit les contraintes hors emprise calculées par le laminage, multipliées par un facteur de chargement croissant de 0 à 1 ; lorsque le chargement devient suffisant, le flambement est détecté et les contraintes compressives peuvent se relaxer en même temps que le défaut de planéité se crée (déplacement hors-plan). Le même modèle peut être utilisé sous tension intercage superposée (défaut latent) puis lors du relâchement de cette tension, simulant ce qui se passerait lors de la découpe de la tôle chez l'emboutisseur par exemple (défaut de planéité manifeste). Pour cela, la méthode préférée du LEM3 est la Méthode Asymptotique Numérique (MAN), méthode de suivi de courbe déplacement hors-plan / chargement, très efficace de par le développement en série d'ordre élevé de la solution par rapport au paramètre de chargement. Mais une méthode plus simple, présupposant des défauts de planéité standard, ondulation dans le sens travers, permet de décomposer le déplacement hors-plan en une sinusoïde en sens long et une forme paramétrée en sens travers : on résout alors une série de calculs éléments finis 1D en sens travers (au lieu de 2D).

La partie hors-emprise peut être traitée en découplé : simple transfert des contraintes, puis application d'un algorithme de flambement. C'est la façon habituelle de faire dans la littérature. Dans la thèse de K. Kpogan, méthode MAN et méthode simplifiée ont été comparées, montrant une bonne précision de la méthode simplifiée ; une application montre la restriction des défauts manifestes lorsque la tension de bande augmente.

Mais des modèles *couplés* ont été développés aussi :

- couplage du code éléments finis 3D de laminage LAM3-TEC3 avec un modèle éléments finis de coques élastiques en grandes déformations, avec flambement MAN 2D. Les contraintes issues du calcul de laminage sous l'hypothèse de planéité maintenue, fausses de ce fait, sont transmises au modèle de coques, les contraintes excessivement compressives sont relaxées partiellement dès lors que le flambement est détecté, puis ces contraintes corrigées sont réappliquées au calcul de laminage proprement dit comme condition aux limites de l'emprise des cylindres. Les contraintes finalement issues de ce modèle couplé sont enfin en bon accord avec la mesure des rouleaux de planéité. C'est un modèle complexe mais complet, précis mais coûteux en temps de calcul.

- un modèle simplifié analogue à celui de Kpogan a été couplé à LAM3 aussi (thèse Nakhoul). Des difficultés ont été rencontrées du fait du champ de contrainte complexe qui règle dans une courte zone en sortie d'emprise, là où les contraintes se réorganisent avant que n'apparaissent les défauts.

- une autre approche a été mise en œuvre par Abdelkhalek, qui consiste, une fois le critère de flambement atteint, à décrire le post-flambement comme une composante supplémentaire de déformation – qui s'ajoute à la déformation élastique et à la déformation plastique. Ce modèle fortement couplé converge, donne des champs de contraintes et des modes de flambement réalistes, c'est la méthode implantée à l'heure actuelle dans LAM3 pour prédire les défauts de planéité.

- une dernière méthode, prospective, mise en œuvre elle aussi dans la thèse de Kpogan, consiste en un couplage Arlequin du modèle FEM 3D sous emprise et de FEM coques hors emprise. Dans la méthode Arlequin, une zone de recouvrement entre les deux modèles est définie et les deux solutions sont forcées d'y coïncider par une méthode de multiplicateur de Lagrange. Des résultats encourageants ont été obtenus, montrant la formation et le déplacement de vagues au cours du calcul – aucune des autres méthodes n'en est capable. Le champ de contraintes calculé est aussi en bon accord avec la mesure.

En ce qui concerne le planage, c'est la simulation du planage sous traction qui nous est proposée en 3D, montrant la prédiction de la capacité de correction d'un défaut de planéité entrant.

Une liste des publications correspondantes est fournie en fin d'exposé pour le lecteur intéressé à en savoir plus.

I - Hérité de l'endommagement dans la formation des criques de rive après cisailage à froid - C. Hubert, L. Dubar, A. Dubois, M. Dubar (Université Polytechnique Hauts-de-France, LAMIH, Valenciennes)

Lors du laminage à froid sur multicylindres Sendzimir sont constatés des défauts de rives nommés « dents de scie ». À y regarder de plus près, il s'agit de protrusions encadrées par des fissures sur les faces découpées par les cisailles rotatives de rive. L'étude expérimentale menée sur des rives cisailées avec le simulateur de laboratoire URT (Upsetting-Rolling Test) montre la formation de fissures à $\sim 45^\circ$, plutôt dans la zone cisailée que dans la zone arrachée ; à partir du

test laboratoire, ces fissures ont pu être caractérisées en ouverture et en profondeur. L'étude montre un certain effet du glissement en avant, imposé sur l'URT, mais surtout qu'un recuit entre cisailage et « laminage » atténue le problème. L'érouissage et sa saturation, et/ou l'endommagement, sont donc des contributeurs fondamentaux.

La séquence a ensuite été simulée numériquement (Abaqus) : le cisailage en 2D, puis les cartes matériau ont été transférées dans un calcul 3D de l'essai URT sur une rive – recuite ou non. Les simulations sont faites avec calcul d'endommagement et élimination des éléments trop endommagés par « kill element ». L'examen attentif montre bien des sites de rupture, qui disparaissent si on recuit, qui s'aggravent si le glissement en avant augmente ou le diamètre des cylindres diminue, retrouvant correctement les résultats expérimentaux.

Là encore, les articles cités permettront au lecteur intéressé d'en savoir plus. Les limites sont à trouver dans une démarche semi-quantitative du fait d'un endommagement en conditions complexes (cisaillement) et de la difficulté de transférer proprement des champs du 2D (cisailage) au 3D (laminage ou URT). En conclusion, on ne saurait trop souligner l'importance de ces effets d'hérédité et la nécessité de les prendre en compte dans une approche « through process ».

J - Etat de l'art du laminage sous Forge® : version stationnaire et version incrémentale – U. Ripert (Transvalor)

La simulation stationnaire (quasi-eulérienne) est une réponse aux demandes de réduction du temps de calcul : on remplace les nombreux incréments de temps par quelques itérations de point fixe entre calcul de champ de vitesse \mathbf{v} et résolution de l'équation de stationnarité de la surface en milieu continu, $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0$ (\mathbf{n} étant le vecteur normal à la surface). Après avoir rappelé que la version incrémentale (standard) de Forge® permet de résoudre de nombreux problèmes de régime transitoire (engagement, flexion en laminage asymétrique, laminage retour, perçage et laminage de tubes en instationnaire, laminage circulaire en ALE...), U. Ripert explique sur quelles bases a été développée cette nouvelle formulation stationnaire et montre des exemples d'applications, sans cacher les difficultés : une convergence pas toujours assurée, en particulier en cas de forts déplacements de cambrage ou vrillage s'il n'y a pas 2 plans de symétrie, l'élasticité qui n'est pas prise en compte, le couplage des lois de recristallisation qui reste à finaliser.

K – Table ronde

State of the art in rolling process modelling – P. Montmitonnet (MINES ParisTech – CEMEF)

Pour illustrer quelques points qui n'ont pas été abordés dans les exposés précédents, P. Montmitonnet revient sur les différents niveaux de résultats que l'on peut attendre de la modélisation, avec en particulier les besoins en précision/résolution. Preuve expérimentale à l'appui, il montre ensuite comment une modélisation simplifiée de la déformation des cylindres (théorie des poutres, équations de Boussinesq, contact de Hertz...) autorise une diminution drastique du temps de calcul, c'est la solution retenue dans le logiciel ArcelorMittal / Constellium Lam3/Tec3. Il passe ensuite aux questions ouvertes sur le comportement des intercages où peut se poursuivre la déformation plastique (→ diminution de largeur, changement de profil d'épaisseur), où le flambement se produit si le fluage ne relaxe pas suffisamment les contraintes, où la recristallisation modifie le comportement mécanique.

Après cette introduction, la discussion s'engage sur la déformation élastique des outils, et plus largement les écarts entre géométrie nominale et réelle (causés aussi par l'usure). Prendre en compte l'élasticité des outillages peut conduire à des temps de calcul inacceptables (LPP), il est alors important de savoir si l'impact en est fort, soit à l'aide de l'expérience, soit à l'aide de calculs découplés (possibles en post-processeur).

De la même façon, on sait que l'expérience, numérique ou physique, est souvent menée dans les conditions nominales, faisant fi par exemple de la température réelle des outils en fonctionnement. Cela veut dire qu'il faut aussi avoir une thermique stationnaire des outils même si l'on travaille en calcul instationnaire, car les

temps d'établissement du régime thermique sont en général très grands devant ceux de la déformation mécanique, au moins pour les outils de grande taille. De tels algorithmes de contact thermique cyclique ont d'ailleurs été mis au point pour le forgeage.

Une autre question porte sur les opérations de dressage qui, dans l'assistance, concernent Ugitech et Ascometal pour les barres, Framatome et Vallourec pour les tubes. Les deux premières faisant maintenant partie du même groupe, un bref échange sur les travaux des uns et des autres et sur les modèles développés se poursuivra sans problème. Quelques éléments sont donnés. Du côté d'Ugitech (barres), un modèle simple a été développé sur la base de calculs Forge en 3D. Chez Vallourec, pour les tubes, on utilise plutôt des éléments coques. Parmi les phénomènes à étudier se trouve la génération de contraintes résiduelles qui accompagne l'amélioration de la rectitude. On rappelle que la CT Laminage avait organisé, avec un succès mitigé, une session « planage et dressage » à la conférence ESAFORM 2016 ; il y avait eu deux papiers intéressants sur le dressage de barres en provenance de République Tchèque (Brno).

La science des données, l'Intelligence Artificielle, l'exploitation statistique des bases de données sont dans l'air du temps. On fait beaucoup de mesures par beaucoup de capteurs, en laminage (<https://sf2m.fr/wp-content/uploads/2018/12/PMontmitonnet-Assessment-In-Line-Measurement.pdf>). Le sujet est lancé sur un mode provocateur par P. Montmitonnet : « l'exploitation des données des acquisitions va-t-elle remplacer la résolution numérique des équations du problème physique ? ». Les datalogging sont depuis longtemps utilisés pour ajuster les coefficients des modèles on-line. Dans un autre ordre d'idée, les fournisseurs d'équipement proposent désormais d'héberger sur leur Cloud et de traiter les données acquises par les capteurs pour détecter en amont les dérives de fonctionnement des machines et déclencher une maintenance avant la survenue de la panne. La détection en ligne de défauts de surface des cylindres à l'aide d'algorithmes puissants d'analyse d'images est maintenant une réalité qui évite de sortir des kilomètres de bande défectueuse. Ces exemples montrent que nous sommes déjà dans ce monde-là mais comment va-t-il évoluer et nous forcer à évoluer ? Certains participants soulignent le danger que peut représenter des effets de mode dans les prises de décision à haut niveau et les orientations stratégiques.

Tous les participants mentionnent des réflexions ou actions en cours dans leur entreprise. A. Navarro (Transvalor) souligne que nous avons souvent à traiter des cas où un défaut est dû à une très forte sensibilité à un paramètre, situations pour lesquelles la simple analyse des données passées et le raisonnement par cas sont mal adaptés. D. Cardinaux (Industeel) est d'avis que de même que la simulation n'a pas remplacé l'expérience, nécessaire ne serait-ce que pour valider la modélisation, l'analyse des données massives ne remplacera pas le calcul des procédés. En outre, le raisonnement par cas (analogies) lui semble tout de même intéressant pour ne pas recalculer toutes les gammes, très nombreuses chez Industeel mais pas forcément si différentes entre elles. Par contre lors de l'introduction de nouveaux alliages ou nouveaux produits, on ne peut pas se passer du soutien de la modélisation. Nelson Souto souligne l'utilisation bien établie des modèles régressés avec coefficients adaptatifs ; il attire l'attention cependant sur la nécessité de ne pas perdre le sens physique des variations des paramètres, que la modélisation à base physique permet de conserver. De même pour N. Marouf (Vallourec), ces outils qui auront indiscutablement leur place ne permettent pas de se passer de véritables spécialistes, des procédés, des matériaux, capables d'aiguiller vers les données *pertinentes* (T. Sourisseau). Ce sont des moyens descriptifs qui ne permettent pas de comprendre et par là de se préparer à faire face aux problèmes suivants.

Pour terminer, on aborde la complexité de la modélisation et du couplage des évolutions des matériaux que sont la recristallisation et l'endommagement. Sur le premier point, A. Gaillac en profite pour signaler que dans le cadre du GDR (Groupement de Recherches) CNRS « Recristallisation » (ReX), il existe un Groupe de Travail qu'il coordonne, dénommé GT5 "Recristallisation en milieu industriel : quels besoins, quelles solutions ?" qui va organiser une journée sur ce thème en 2019 - à suivre sur <http://www.ige-grenoble.fr/pages-personnelles/maurine-montagnat-rentier/gdr-recristallisation/> . Sur le second, on ne peut que signaler l'efficacité très moyenne des modèles phénoménologiques macroscopiques qui ne détectent même pas toujours la bonne localisation des fissures. La modélisation micro-macro fournit une alternative mais à un coût très élevé. La question reste béante.